

郝萍萍,韩金朝,刘 晓,等. 土壤水分含量测定方法的技术现状与发展趋势[J]. 江苏农业科学,2024,52(17):11-20.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.17.002

# 土壤水分含量测定方法的技术现状与发展趋势

郝萍萍<sup>1,3</sup>, 韩金朝<sup>1,3</sup>, 刘 晓<sup>3,4</sup>, 宋 蕾<sup>1,2</sup>, 苗发强<sup>2</sup>, 冯俊杰<sup>2,3</sup>

(1. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡 453000;

3. 淄博数字农业农村研究院, 山东淄博 255000; 4. 淄博市农业科学研究院, 山东淄博 255000)

**摘要:**土壤水分含量是监测土壤墒情、预测指导灌溉和响应农业旱情灾害的最直接和必要的关键技术指标,对于促进农业现代化、精准化和智能化发展具有重要的现实意义。本研究重点评述了土壤水分含量测定方法的研究进展,系统总结了土壤水分含量的多种测定方法。首先本研究依据测量范围进行分类,针对性地评述了取样-定位法和遥感监测法2种方法,结合各方法的工作原理和适用场景,系统整理了各测量方法的优缺点和应用范围,以供研究人员在实际测量过程中,根据测量对象、设备预算、环境要求和准确度要求选择合适的土壤水分含量测定方法;其次通过中国知网(CNKI)的数据库检索,对1980—2023年的各水分钠含量测量方法分阶段进行趋势分析,展示总体趋势分析图和各阶段的研究热点图,体现各阶段的发展趋势;最后结合各技术的发展水平和发展方向,进行技术进展分析,分析土壤水分含量测定方法的发展趋势和应用前景,为优化改进土壤水分测定方法技术以及实现更方便、高实时度、高精度的土壤水分含量测定提供参考,以期促进土壤水分含量测定研究的深入开展。

**关键词:**土壤;水分含量;取样-定位法;遥感监测法;研究热点;进展

**中图分类号:**S152.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)17-0011-09

水是不可或缺的重要自然资源,而农业是用水大户,水利部发布的《中国水资源公报 2022》显示,2022 年全国降水量和水资源量比多年平均值偏少,其中农业用水为 3 781.3 亿  $\text{m}^3$ ,约占社会所有行业用水总量的 63.0%<sup>[1]</sup>。灌溉作为农业生产的关键环节,对农业生产效率具有直接影响<sup>[2]</sup>,2022 年耕地实际灌溉用水量为 5 460  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ,农田灌溉水有效利用系数为 0.572。农业用水量较大,但农业生产率低下<sup>[3]</sup>,随着水资源日益紧缺,节水农业越来越受到国内外关注,实时测定土壤含水率、精准监测土壤水分含量对灌溉决策具有重要意义,也是节水灌溉技术发展和智慧灌溉的研究重点<sup>[4]</sup>。土壤水分含量不仅是灌溉决策的基础数据指标,同时也是农业决策、干旱防控等方面的关键因素之一。土壤水分含量直接影响着农业灌溉,土壤水分含量过高或过低均会影响作物生长,水分含量过高会促进作物根系无氧呼吸产生乙醇,出现烂根现象,还极易孳生

病害,农作物表现出细弱、抗寒抗病性差、产量低等特征;水分含量过低会直接影响作物的光合作用和蒸腾作用,同时限制农作物对于肥料的吸收,抑制作物正常生长发育,从而影响农作物的产量<sup>[5]</sup>。

在干旱防控方面,我国的干旱或者半干旱地区,如山西北部、陕西北部、甘肃南部等地区,农业用水主要来源为自然降水,对其开展土壤水分监测预报工作,可以掌握大面积的土壤水分情况和土壤旱情程度,土壤水分含量信息能为农民及时把握灌溉时机、适时适量灌溉和政府及时制定抗旱减灾对策提供科学依据,最终达到旱情防控目的。而土壤水分监测预报工作需要使用土壤水分含量信息作为参考依据,进而分析土壤状况,选择施肥或施水时间,充分发挥水资源效益,为实施正确的农业决策提供依据。在土壤质量方面,农田大部分的土地遭受着盐碱化的威胁,为避免土壤质量下降和预防土地退化,必须了解土壤中水分含量,提高水资源的利用效率和土壤质量,同时不同的土壤水分会带来物理模式的偏差<sup>[6]</sup>。

综上,土壤水分的准确监测可为灌溉决策方案响应、预防旱灾发生和保证作物生长处于更优的水土环境等提供重要的指导意义<sup>[7]</sup>。当前,土壤水分含量的测定方法主要集中在微波遥感、传感器等方

收稿日期:2023-09-18

基金项目:智慧灌溉物联网设备融合技术研究项目(编号:IFI2023-27)。

作者简介:郝萍萍(1999—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向农业工程与信息技术。E-mail:599989422@caas.cn。

通信作者:冯俊杰,博士,研究员,主要研究方向农业水土工程。

E-mail:fjjdg@sina.com。

面,综合对比分析关注较少。对此,本研究系统整理了土壤水分含量的多种不同监测方法,针对性地评述了时域反射法、频域反射法、遥感监测法等方法,并结合综合技术的发展水平和发展方向,分析其发展趋势,以期促进农业中土壤水分含量测定研究的深入开展。

1 土壤水分含量测定方法及分类

1.1 测定方法与配套设备

根据相关文献的检索与研究分析,参考相关研

究结果,现有土壤水分含量的测定方法有烘干法、张力计法、中子仪法、时域反射法、频域反射法、遥感法等多种方法,但因土壤类型多样、土壤层次具有地域差异性、设备使用方法复杂等多种因素,在实际应用中需综合考虑选择合适的测定方法。

通过对市面上的各种土壤水分监测设备的调研发现,目前市面上有张力计(图 1)、土壤水分速测仪(图 2)、智墒(图 3)、中子仪(图 4)、无人机遥感设备(图 5)等多种土壤水分监测设备。



图1 土壤张力计



图2 土壤水分速测仪



图3 智墒



图4 中子仪

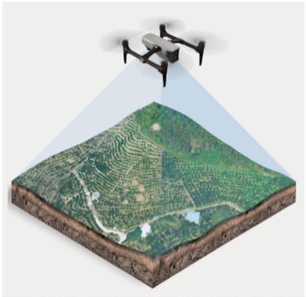


图5 无人机遥感设备

1.2 土壤水分监测设备分类

不同的土壤水分监测设备具有不同的工作原理、应用方式和测量手段,因此按照测定手段、测定仪器、测定结果等,土壤水分含量测定方法又分为

多种类别。从测定手段上,分为直接测定法和间接测定法,其中,直接测定方法有烘干法、张力计法、中子仪法等;间接测定法有时域反射法、频域反射法、遥感法等。从测定仪器上,分为接触式和非接触式,其中,接触式仪器有张力计法、中子仪法、时域反射法、频域反射法等;非接触形式有遥感法等。从测定结果上,分为测定质量含水量和体积含水量,其中,测定质量含水量的方法有烘干法、中子仪法等;测定体积含水量的方法有张力计法、时域反射法、频域反射法等。从研究手段和范围(尺度)上,将国内外现有的土壤水分含量测定方法划分为取样-定位测量法和遥感监测法<sup>[8]</sup>。

本研究依据测定范围进行分类,讨论取样-定位法和遥感监测法 2 种方法。取样-定位法适用于单点土壤水分含量测定,遥感法适用于区域的土壤水分含量测定,因此土壤水分含量测定方法的详细分类,见图 6。

1.3 取样-定位测量法

目前,常用的土壤水分含量测定方法有烘干法、张力计法、中子仪法、时域反射法和频域反射法等<sup>[9-12]</sup>。取样-定位测量法具有结构简单、易操作、方式多等特点和优势,但多基于单点土壤水分测量,难于实现实时监测、大范围的土壤水分含量测量

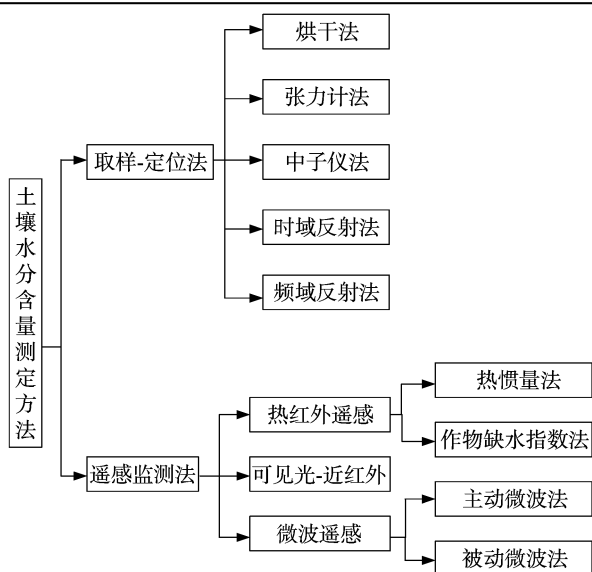


图6 土壤水分含量测定方法分类

的需要。

**1.3.1 烘干法** 烘干法是最早使用土壤水分含量的测定方法,计算结果相对准确、符合实际,且操作简单、成本低廉,其测定结果一般作为其他测量结果的对照参考,可以确定其他测试结果精度,是衡量其他办法的标尺。烘干法是测量土壤含水量的参考方法,用于校准和修正其他水分测量方法<sup>[13]</sup>。

烘干法的工作原理:通过提高土壤的温度,加速内部水分向表面转移的速度。工作流程:将获得的土样盛放入铝盒,盖紧送回实验室进行称重。称重完毕后,放入 105 ℃ 的恒温烘箱,烘干时间为 12 h。结束后取出放入干燥环境内冷却至室温,进行称重。烘干后土样失去的水分含量即为土壤的水分含量。干燥后称量土壤和铝盒的总重,土壤含水量( $W$ )用式(1)表示:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \quad (1)$$

式中: $m_1$  为干燥前土壤与铝盒重量之和; $m_2$  为干燥后土壤与铝盒重量之和; $m_3$  为空铝盒的重量<sup>[14]</sup>。

**1.3.2 张力计法** 土壤水分张力计是从能量角度表征和测量土壤水分含量信息的基本仪器,基于土壤张力计电阻应变原理设计,电阻应变原理是指金属导体的电阻在导体受力产生长度变形时发生变化的现象,当金属电阻丝受到拉力时,其长度伸长引起电阻增加;长度缩短引起电阻减小。

土壤张力计是由电子真空表,真空玻璃管和陶瓷头组成,由真空表显示水分信息。张力计法工作原理:真空玻璃管中注满水后,陶瓷头阻止外部空

气进入装置。当被测土壤的水势与玻璃管内存在压强差值时,张力计通过放水和吸水过程,直至与外部土壤达到稳定平衡状态,此时,压力表所显示的值即为被测土壤的土壤水势。土壤水分含量是土壤的参数指标,土壤对水的吸力大小从能量角度反映土壤水分含量状况,土壤吸力愈小时,反映出土壤含水量愈大;土壤吸力愈大时,反映出土壤含水量愈小。因此,土壤张力计的真空表读数能反映出土壤水分含量信息。

它可以定义为植物根系从土壤中吸取水分所需的能量,也可以将其视为土壤基质为保持水分而施加的力<sup>[15]</sup>。土壤水的势能可以用表达式(2)表示:

$$\varphi = \varphi_m + \varphi_o + \varphi_p + \varphi_g \quad (2)$$

式中: $\varphi$  是每单位质量、体积或重量水的势能;下标  $m$ 、 $o$ 、 $p$  和  $g$  分别是矩阵、渗透、压力和重力势<sup>[16]</sup>。

**1.3.3 中子仪法** 中子仪法使用放射性元素的原子核变化形成了快中子,将快中子碰到水分中的氢,并在碰撞下产生能量变化而形成了慢中子云,由专门的电子传感器接收数据并将其能量转化,可通过测定慢中子云的密度与土壤含水量的相关关系以确定土壤中的水分含量<sup>[17]</sup>,即氢原子越多,慢中子云密度就越大,土壤中水分含量越高。中子仪的工作原理:通过测量中子源与土壤中各种元素相碰撞损失的能量,绘制土壤含水率变化和中子计数的曲线,利用回归方程计算出土壤含水量百分比,可适用于多种土壤类型、各种土质层次、土壤质地及土剖面含水率变化规律等要求的曲线<sup>[18]</sup>,并用直线回归方程式(3)表示:

$$O_p = a + bR_n \quad (3)$$

式中: $O_p$  为土壤含水量(干土重)百分数; $R_n$  为计数率比; $b$  是标定曲线的斜率,它反映的是仪器灵敏度,与中子源有关; $a$  是标定曲线的截距,受土壤容重、质地、化学组成的影响<sup>[19]</sup>。

**1.3.4 时域反射法** 时域反射法是一种电容测量方法,它利用电磁波在传输线上的反射特性来测量电容器的电容值。时域反射法的工作原理:通过测量高频电磁波中导波探头(插入土壤内)的传输时间来确定土壤介电常数,从而利用土壤介电常数和土壤体积含水量之间的经验关系计算出土壤含水量,间接测量土壤水分<sup>[20]</sup>。介电常数的计算采用表达式(4):

$$\epsilon = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (4)$$

式中:介质相对介电常数 $\epsilon$ 取决于土壤水分含量等土壤性质,水分含量变化将引起相对介电常数 $\epsilon$ 的变化; $c$ 为光速; $L$ 为导波探头长度; $t$ 为高频电磁波沿导波探头传输和返回时间<sup>[21]</sup>。

**1.3.5 频域反射法** 频域反射法利用电磁脉冲原理得到土壤水分含量。频域反射法的探头主要由 1 对电极组成 1 个电容,电极间的土壤作为电介质,传感器电容量与两级间被测介质的介电常数成正比关系<sup>[22]</sup>。频域反射法的工作原理:当土壤中水分增加时,土壤介电常数会相应增大,测量电容值也相应上升,导致传播频率发生变化,由此测得土壤水分含量。

频域反射法通过测量介质中电磁波的传播频率,得到土壤的表观介电常数。电容与介电常数的关系采用表达式(5)表示:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} \quad (5)$$

式中: $C$ 为所测介质的电容, $C_0$ 是介质为空气时的电容<sup>[23]</sup>。利用上式可以求得土壤的相对介电常数。

研究证实土壤介电常数与土壤水分含量之间具有线性关系,采用表达式(6)表示:

$$\omega = a\sqrt{\epsilon} + b \quad (6)$$

式中: $a$ 、 $b$ 是 2 个常数,由土壤的类型决定,可以获取测量值<sup>[24]</sup>。

#### 1.4 遥感监测法

遥感技术提供了一种周期性、区域性、全覆盖、多时相的观测手段,具有时效快、测量范围广、精度高及较优的时间、空间分辨率等优点<sup>[25-27]</sup>,为土壤水分含量信息的获取提供基础保证和土壤水分测量方法带来技术支持。目前,遥感技术已成为测定大区域范围内土壤水分时空分布和变化的主要方法。遥感监测法主要分为热红外遥感、可见光-近红外遥感和微波遥感法等。

**1.4.1 热红外遥感** 热红外遥感利用土壤的性质,其原理为土壤水的比热大,受热后温度变化较慢,因此,白天下垫面温度的空间分布能间接反映土壤水分的分布,是间接反演土壤水分的一种方法<sup>[28]</sup>。热红外遥感是指红外传感器工作在红外波段范围之内的遥感,利用光学技术,记录地球表面的发射辐射能,通过应用红外遥感器(如红外摄影机、扫描仪、红外波谱仪、遥感光谱仪)获取远距离的植被等地面物体所反射或辐射红外特性差异的信息,由此确定地面物体性质、状态和变化规律<sup>[29]</sup>。热红外遥

感主要用来观测土壤表层水分。常见的热红外遥感法有热惯量法和作物缺水指数法。

**1.4.1.1 热惯量法** 热惯量法是国内外监测土壤水分含量常用的方法之一。热惯量是土壤性质中的一种热性质,是引起土壤温湿度变化的内在因素,热惯量法的工作原理:通过计算土壤热特性得到的模型对土壤水分含量进行推算,该模型的物理基础是水分具有较大的热性质,因此较高水分的土壤具有较大的热惯量,成正比关系。热惯量可用表达式(7)表示:

$$P = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (7)$$

式中: $P$ 为热惯量; $\lambda$ 为土壤热导率; $\rho$ 为土壤密度; $c$ 为土壤比热<sup>[30]</sup>。

在得出相应的热惯量后,即可通过经验公式(8)计算得出土壤水分含量( $W$ ):

$$W = aP + b \quad (8)$$

式中: $a$ 和 $b$ 为经验参数,经验公式包含多种类型函数,可为线性的幂函数或指数函数等<sup>[31]</sup>。

热惯量法主要适用于裸地或植被生长早期,对裸土地、植被覆盖低、干旱荒漠地区效果较好,在高植被覆盖区监测效果不佳。热惯量遥感监测土壤水分的理论逐步成熟,基于热惯量的众多水分监测模型和遥感方法已经在实际的农田中得到应用。

**1.4.1.2 作物缺水指数法** 作物缺水指数法的工作原理:计算植被水分蒸腾与最大可能蒸发的比值,可在一定程度上反映植物根系范围内土壤水分的信息,用来衡量作物缺水程度<sup>[32]</sup>。Jackson 等以能量平衡为基础,利用热红外遥感温度和气象资料,间接监测植被覆盖条件下的土壤水分,提出了作物缺水指数(CWSI)的概念<sup>[33]</sup>,采用表达式(9)表示:

$$CWSI = 1 - \frac{E_t}{E_{tp}} \quad (9)$$

式中: $E_t$ 为实际蒸发量; $E_{tp}$ 为潜在蒸散发量。

作物缺水指数法以单层能量模型为基础,在反演过程中所需的资料多、计算量大、不易模拟研究,适用于植被覆盖度较高的区域。其模型中使用的温度和气象数据主要来自地面气象站,作物缺水指数法的反演精度会受到气象数据的实时传输和数据精准度的影响。

**1.4.2 可见光-近红外遥感** 可见光-近红外遥感主要是利用地面物体反射光谱信息,使用相关仪器显示土壤和植物的光谱,采用光学遥感实现土壤

水分的快速测定,利用光学技术,记录地球表面对太阳辐射能的反射辐射能。通过测量可见光和近红外光反射率的变化来检测植物水分胁迫。一般来说,受胁迫植物在近红外区域的反射率较低,在可见光区域的反射率较高<sup>[34]</sup>。目前,在可见光-近红外波段,常用的方法是利用 Landsat 或 MODIS 等多光谱数据构建相应的干旱指数或植被指数来反映土壤水分含量<sup>[35]</sup>。

1.4.3 微波遥感 微波遥感的工作原理是利用无线电技术反演土壤含水量,利用传感器接收并测量作物以及周围环境反射或发射的不同波长微波信号,提取和分析有效数据<sup>[36]</sup>。微波遥感对土壤湿度反应敏感,可以用于测定土壤水分含量。从技术上划分,微波遥感分为主动遥感和被动遥感 2 类,主动遥感记录地球表面对人为微波辐射能的反射辐射能;被动微波记录地球表面的微波辐射能。

1.4.3.1 主动遥感 主动微波遥感是利用主动式的传感器,发射微波再接收由地面物体反射或散射回来的波段,传感器主要为雷达,如合成孔径雷达、侧视雷达等,它测量土壤的后向散射系数(主要由介电常数和土壤粗糙度决定,介电常数由土壤湿度决定),因此通过构建后向散射系数与土壤水分的数理关系来进行土壤水分遥感监测<sup>[37]</sup>,可以利用雷达反演土壤水分含量。反演土壤湿度的原理是通过设定系统参数,使土壤湿度作为敏感参数,把植物的几何特征参数设为不敏感参数,从而利用后向散射系数反演出土壤水分信息<sup>[38]</sup>。目前,主动微波

反演方法大致可分为:经验法、理论建模法、变化检测法和人工智能法<sup>[39]</sup>。研究表明,主动微波遥感的信号强,图像数据分辨率高,今后的研究中可将地表粗糙度这一影响因子应用于模型中以提高其适用性。

1.4.3.2 被动遥感 被动微波遥感是利用被动式的传感器,依靠接收地面物体自身辐射的微波,如微波辐射计、微波散射计等,通过观测辐射亮温(由土壤介电常数和土壤温度决定,介电常数与土壤湿度有关),再结合土壤物理温度计算土壤的发射率,进而反演土壤水分含量。现阶段国内外学者已建立相关的理论模型和经验模型,被动微波遥感将反演方法划分为统计拟合法、机理模拟法和人工智能法<sup>[40-41]</sup>。被动微波遥感具有监测面积大、重复周期短、数据量低、数据处理简单、对土壤水分更为敏感等优点,成为反演土壤水分最有潜力的方式,适合大区域土壤水分反演的算法<sup>[42]</sup>。

2 综合对比分析

2.1 对比分析

综上对土壤水分含量测定方法的相关介绍,土壤水分测量技术方法众多,结合各种方法的优缺点和应用范围进行对比分析,帮助研究人员在实际测量过程中,根据测量对象、设备预算、环境要求和准确度要求选择合适的水分测量方法。取样-定位法、遥感、监测法的对比分别见表 1、表 2。

表 1 取样-定位法对比

方法	优点	缺点	应用范围
烘干法	操作简单、成本低、数据准确直观	操作过程繁杂、时效性差	烘干法适用于任何土壤环境,是一切测量土壤水分含量的基础方法和校准方法
张力计法	价格低廉并能够实时监测	不能用于直接测量土壤真实含水量值,仪器设备易受环境影响	多用于监测湿润土壤的水分含量,不适用于极度干燥的土壤
中子仪法	不受土壤中水分的物理状态影响,仪器使用方便、操作简单	仪器价格昂贵,测量过程中存在潜在辐射	适用于深层土壤含水量的测量与水分动态变化观察
时域反射法	测量结果不受土壤类型、密度、温度的影响,安全、方便、直接便于自动控制	价格昂贵,造价成本高;受盐含量影响大;在线连续监测时稳定性差	适用于电导率较低的粗质、轻质的土壤,不适用有机质和种黏土或盐碱土
频域反射法	量程较宽且测量精度高;自动、连续监测	需按时维护,易受土壤孔隙中空气的影响	不适用于土壤孔隙大、黏粒大的土壤

2.2 总体趋势预测分析

本研究采用中国知网(CNKI)数据库(期刊-所有期刊),研究时段为 1980—2023 年,检索时间为 2023 年 9 月 12 日;研究方向为:土壤水分测量,分别在 CNKI 中的专业检索中检索。文献总数:3 996

篇;检索条件:主题% = ‘土壤水分测量’ or 关键词% = ‘土壤水分测量’;检索范围:总库。

从中国知网检索 1980—2023 年土壤水分测定方法领域的期刊论文,由图 7 可知,1980—2023 年期刊论文的数量呈上升趋势,在近 10 年内,土壤水

表 2 遥感监测法对比

方法	优点	缺点	备注
热红外遥感	具有宏观、快速和动态等优点,适用于植被覆盖度较大的地区,估算精度高	所需的资料较多、计算比较复杂,数据实时性差	与微波方法结合,提高土壤水分的监测精度加速图像数据的接收、处理、分析和传输系统
可见光-近红外遥感	仪器的构造比较简单,易于维护,操作方法简单,应用广泛,可不断拓展检测范围	多光谱数据获取不易,建模难度大	利用无人机遥感,获取多光谱数据以构建土壤水分反演模型
微波遥感	基本上不受云层覆盖和可变量表面太阳照明的影响,精准度高	微波遥感成像环境多变,建立土壤水分反演模型困难;空间分辨率低,受地表粗糙度和植被的影响	主动微波遥感测定土壤水分的研究向着多模式、多波段、多极化发展;被动微波遥土壤水分反演向着高分辨率发展

分测量是研究热点趋势,每年度发表期刊数量均超过 200 篇,2019 年发文量达到顶峰,数量高于 400 篇。

由图 7、图 8 可知,1980—2001 年年均发表论文数量少,在此期间,土壤水分含量测定方法的热点包括中子仪、称重法、烘干法。在测量土壤水分含量的手段上,测量方法相对单一,大多采用的是单点定位法。

由图 7、图 9 可知,2002—2012 年,发表论文一直呈现上升趋势,年均发表论文约 200 篇,总体约 2 000 篇,在此期间,土壤水分含量测定方法的热点包括介电常数、监测、土壤水分传感器等。研究内容和研究方向较上阶段明显变丰富,且研究重点从烘干法、中子仪法等方法转向时域反射法、频域反

射法,集中在无线传感器网络、土壤水分传感器等方面的研究。在测量土壤水分含量的手段上,采用时域反射法、频域反射法、无线传感器等方法。

由图 7、图 10 可知,2013—2023 年,此阶段发表论文最多,年均 300 篇,总体发表高于 3 000 篇,在此期间,土壤水分含量测定方法的热点包括遥感、遥感反演、微波遥感等。研究内容和研究方向从时域反射法、频域反射法等转向遥感监测法,发表的大多是利用遥感技术测定土壤水分含量的文章。在测量土壤水分含量的手段上,已从传统的单点-定位法转向遥感监测法。

3 技术进展分析

随着物联网技术的发展,取样-定位方法中,

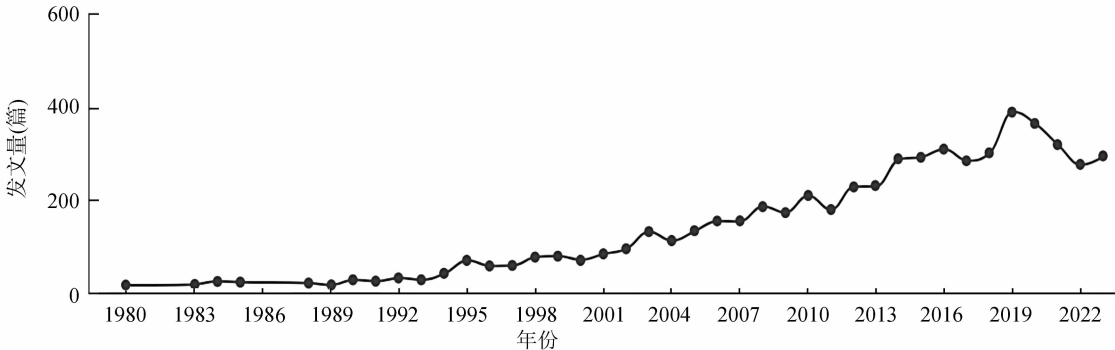


图7 1980—2023 年期刊论文数量总体趋势分析

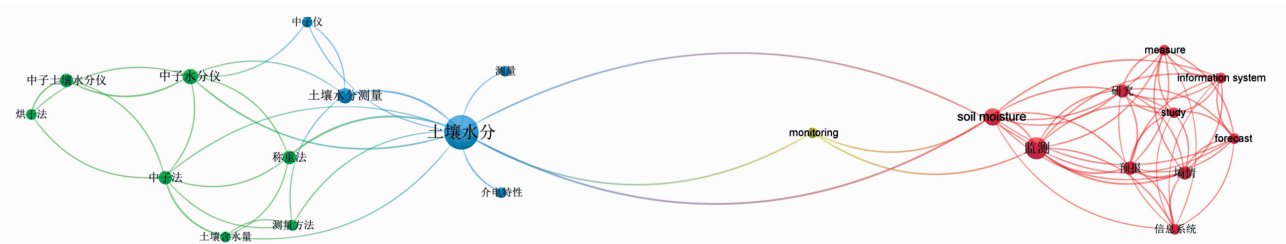
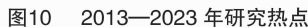


图8 1980—2001 年研究热点





展和遥感模型的改进, 遥感技术在土壤水分监测方面具有广阔的前景。

### 3.1 取样 - 定位法的分析

在传统的土壤水分含量测定方法中,取样 - 定位法适用于测定单点的土壤水分状况,且在过去长时间内,一直使用此法。作物土壤水分的复杂性和多样性,导致了土壤水分测定的困难。以下是对取样 - 定位中各方法的深入分析。

(1)烘干法作为标准方法,其准确度不容置疑,但流程复杂,工作量大,多用于研究试验,需要其他方法的校准。烘干法在取土时会破坏土壤结构及其理化性质,且样本无法重复使用,提高烘干箱的工作效率、确保干燥环境的要求,按照规定流程进行操作。

(2)张力计结构简单且无需电源,可使用不同长度的张力计测定不同土壤深度的土壤水分含量,但在实际使用中无法直接测定土壤水分含量,需要根据土壤水分特性曲线将土壤水分的吸力换算成土壤水分含量。物联网的发展使得张力计结合传感器技术和无线传输技术,实现土壤水分数据的采集和发送,达到远程实时查看土壤水分信息的效果。目前,研发的张力计式传感仪器,实现了从机械式到数字化的跨越,朝向网络化、智能化发展。

(3)中子仪能长期定位连续测定,不破坏土壤,是测定土壤水分含量较好的方法,但此法存在辐射,对人体健康危害较大,在实际使用时要严格遵守流程。中子仪法适用于测定深层土壤水分含量,对表层土壤水分含量的测定不准确,在以后使用中可与自动记录系统和计算机连接,重视分层分布测定水分含量方向。

(4)时域反射法和频域反射法是常用的土壤水分含量测定方法,测量速度快且安全性高,不会对人体健康造成危害。时域反射型、频域反射型的传感器和微控制器易于连接,测量精度高,可根据不同土壤特性建立不同的数学公式。随着物联网技术和传感器技术的发展,提高探针的灵敏度,研发的多传感器网络和分布式测定方法得到广泛应用,在土壤水分自动连续监测中具有很好的发展前景<sup>[43]</sup>。

### 3.2 遥感监测法的分析

相对于传统的取样 - 定位测量方法,遥感在测定土壤水分含量方面具有众多的优势,克服传统方法单点土壤水分监测、范围有限、数据的实时性差等问题,遥感可以测定各种地形和植被覆盖的土壤水分信息,因其自身优势成为测定土壤水分含量的研究重点,引起国内外学者的重视,对遥感法深入

分析发现其具有以下优势。

(1)热红外遥感法属于光学遥感,测定特定波段范围内植被反射的辐射能。热红外传感器可以在不同深度采集土壤水分信息,近些年来星载热红外遥感技术和无人机平台搭载热红外传感器的快速发展,利用热红外遥感测定土壤水分成为研究的热点。

(2)可见光 - 近红外遥感法属于光学遥感,对可见光 - 近红外波段数据进行分析,构建相应的干旱指数或植被指数来反映土壤含水量,此方法对干旱区域测定结果更为准确真实。在获取光谱数据时多使用无人机获取图谱数据,无人机遥感可以提高测定土壤水分的时效。使用无人机获取多光谱数据,构建土壤水分反演模型,为土壤水分测定提供新的技术和方向。

(3)微波遥感使用无线电技术,其主动微波和被动微波均适合大区域土壤水分反演的算法。随着各种新型传感器的开发与应用,土壤水分反演模型也将得到进一步的创新和改进,国内外专家目前正在对所使用的雷达系统进行完善,加上气象、地形等多数据的融合,土壤水分时空分辨率和精度将得到全面提升<sup>[44]</sup>。主动、被动遥感微波融合方法在测定土壤水分信息方面具有发展潜能,两者的结合可实现反演精度提升和获取长时间序列数据。

## 4 总结

传统的取样 - 定位法适用于单点区域的土壤水分测定。随着物联网技术、通信技术和自动控制技术等高新技术的发展,国内外研究人员研制出众多智能土壤水分传感器,不仅能够测定单土层的土壤水分含量,还能够测定多层次的土壤水分含量及土壤温度、盐分等信息,并实现土壤信息的实时采集和传输,远程实时查看,为灌溉提供决策依据。

遥感法是一种无接触、远距离的探测技术,该技术主要通过现代化的运载工具和传感器快速获取大面积地表信息,是测定土壤水分含量的重要技术和发展方向。人工智能技术的普及、卫星遥感的不断进步、反演算法的改进、波段范围的扩大均会使反演精度和分辨率得到提升,遥感法的不断发展为土壤水分数据的获取提供了发展潜力。

国内外研究人员在遥感法的基础上,构建和改进土壤水分反演模型;但针对不同的区域地形建立不同的理论模型过于复杂,因而在研究中根据具体



的区域对模型进行相应改进,提高土壤水分模型的灵活度,从而提升模型在农田应用中的实用性和适用性,为精准农业中大面积快速获取土壤水分信息、实时准确监测提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 2022 年中国水资源公报[J]. 水资源开发与管理,2023,9(7): 封2.
- [2] 杨志成. 提高农业灌溉用水管理效率的措施分析[J]. 南方农机,2023,54(14):92-94.
- [3] Zhang J W, Guan K Y, Peng B, et al. Challenges and opportunities in precision irrigation decision - support systems for center pivots[J]. Environmental Research Letters,2021,16(5):053003.
- [4] 李毅杰,原保忠,别之龙,等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(6):132-138.
- [5] Yuan Q Q, Shen H F, Li T W, et al. Deep learning in environmental remote sensing: achievements and challenges[J]. Remote Sensing of Environment,2020,241:111716.
- [6] Li L, Shangguan W, Deng Y, et al. A causal inference model based on random forests to identify the effect of soil moisture on precipitation[J]. Journal of Hydrometeorology,2020,21(5):1115-1131.
- [7] Gumiere S J, Camporese M, Botto A, et al. Machine learning vs. physics - based modeling for real - time irrigation management[J]. Frontiers in Water,2020,2:8.
- [8] 王大龙,舒英格. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 山地农业生物学报,2017,36(2):61-65.
- [9] 关大陆. 基于 STC8A8K64S4A12 和 AD590 的远程测温系统[J]. 辽宁科技学院学报,2017,19(6):1-2,88.
- [10] 何泽鹏. 基于蜂窝的窄带物联网(NB-IoT)技术性能及应用[J]. 广东通信技术,2017,37(3):29-34,65.
- [11] 徐学义,崔兆韵,黄 华,等. FDR 与烘干法测定土壤水分对比分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2013,44(2):190-192.
- [12] 闫 华,邢 振,薛绪掌,等. 土壤剖面水分传感器探头仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(10):245-251,244.
- [13] 环境保护部. 土壤 干物质和水分的测定 重量法:HJ 613—2011[S]. 北京:中国环境科学出版社,2011:1-4.
- [14] Robinson D A, Jones S B, Wraith J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. Vadose Zone Journal,2003,2(4):444-475.
- [15] Bianchi A, Masseroni D, Thalheimer M, et al. Field irrigation management through soil water potential measurements: a review[J]. Italian Journal of Agrometeorology,2017,22(2):25-38.
- [16] Campbell G S. Soil water potential measurement: an overview[J]. Irrigation Science,1988,9(4):265-273.
- [17] 谢鹏宇,刘泽鑫. 土壤水分测量原理与技术方法研究[J]. 现代农业科技,2020(23):166-168.
- [18] 田昌玉,孙文彦,林治安,等. 中子仪测定土壤水分方法的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(18):7-11.
- [19] 郭洪飞,熊运章. 中子法测定旱地土壤水分中标定方法的改进[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),1991,19(1):39-42.
- [20] Schanz T, Bailie W, Tuan L N. Effects of temperature on measurements of soil water content with time domain reflectometry[J]. Geotechnical Testing Journal,2011,34(1):1-8.
- [21] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research,1980,16(3):574-582.
- [22] 李晓斌. 基于时域反射技术的土壤剖面分布式含水量测量研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022:1-63.
- [23] Cosenza P, Tabbagh A. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity[J]. Applied Clay Science,2004,26(1/2/3/4):21-36.
- [24] 冶林茂,吴志刚,牛素军,等. GStar-I 型电容式土壤水分监测仪设计与应用[J]. 气象与环境科学,2008,31(3):82-85.
- [25] 李思颖. 遥感技术在估算土壤水分中的应用:基于文献计量学分析[J]. 水利科技与经济,2023,29(6):139-143.
- [26] 李映祥,张 华,滕 飞,等. 遥感技术农业资源台账建设应用潜力分析[J]. 中国农业资源与区划,2022,43(11):145-154.
- [27] Petropoulos G P, Ireland G, Barrett B. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: current status, products & future trends[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2015,83/84:36-56.
- [28] 潘 宁,王 帅,刘焱序,等. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 生态学报,2019,39(13):4615-4626.
- [29] 苗馨远. 宽波段光学遥感图像特征分析及协同分类技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022:1-152.
- [30] 马春芽,王景雷,黄修桥. 遥感监测土壤水分研究进展[J]. 节水灌溉,2018(5):70-74,78.
- [31] Xue Y, Cracknell A P. Advanced thermal inertia modelling[J]. International Journal of Remote Sensing,1995,16(3):431-446.
- [32] 虞文丹,张友静,郑淑倩. 基于作物缺水指数的土壤含水量估算方法[J]. 国土资源遥感,2015,27(3):77-83.
- [33] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research,1981,17(4):1133-1138.
- [34] Kurihara J, Koo V C, Guey C W, et al. Early detection of basal stem rot disease in oil palm tree using unmanned aerial vehicle - based hyperspectral imaging[J]. Remote Sensing,2022,14(3):799.
- [35] Ghulam A, Qin Q M, Zhan Z M. Designing of the perpendicular drought index[J]. Environmental Geology,2007,52(6):1045-1052.
- [36] 邓小东,王宏全. 土壤水分微波遥感反演算法及应用研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2022,48(3):289-302.
- [37] 李伯祥. 基于光学与微波遥感数据的植被覆盖区农田土壤水分反演[D]. 抚州:东华理工大学,2020:1-81.
- [38] 覃湘棕,庞治国,江 威,等. 土壤水分微波反演方法进展和发展趋势[J]. 地球信息科学学报,2021,23(10):1728-1742.

高 乐,刘 渝,胡尊瑞,等. 侵染我国黄瓜病毒种类的研究进展[J]. 江苏农业科学,2024,52(17):20–26.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.17.003

# 侵染我国黄瓜病毒种类的研究进展

高 乐<sup>1</sup>, 刘 渝<sup>2</sup>, 胡尊瑞<sup>1</sup>, 周 博<sup>1</sup>, 郑志勇<sup>1</sup>, 任俊达<sup>2</sup>

(1. 北京农业职业学院园艺系, 北京 102442; 2. 北京农学院农业农村部华北都市农业重点实验室, 北京 102206)

**摘要:**黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是一种重要的园艺蔬菜作物,具有重要的食用和经济价值,然而病毒病严重影响我国黄瓜的产量和品质。近年来,我国科研人员对不同地区黄瓜病毒病的流行情况开展了广泛深入的研究,本文梳理整合了前人的研究结果,发现在全国范围内采集的黄瓜样品中检出的病毒达到 20 种之多,涉及 10 个科、11 个属,其中以马铃薯 Y 病毒属(*Potyvirus*)的病毒数量最多,达到了 7 种,并且除 TYLCV 为 DNA 病毒以外,其余均为 RNA 病毒,说明 RNA 病毒导致的黄瓜病毒病在我国占据绝对主导地位,其中又以 *Potyvirus* 病毒对我国黄瓜的侵染最为广泛,是威胁黄瓜生产的最大病毒种群。进一步,通过分析病毒种类的地理分布,说明在全国范围内须加强对 CMV、CCYV、CGMMV 以及 *Potyvirus* 中 PRSV 和 WMV 的防治工作和抗病育种研究;其中,黄淮海流域和长江流域应重点针对 CMV 以及 *Potyvirus* 中的 WMV 和 ZYMV;此外,江苏、甘肃、重庆、海南的黄瓜病毒病较为严重,各地区应予以重视。随着科学技术的进步,新兴的小 RNA 深度测序技术已被广泛应用于病毒的鉴定当中,打破了传统方法只能检测已知病毒的局限性,未来将会成为一种常规高效的病毒检测手段,具有广阔的应用前景。

**关键词:**黄瓜;病毒;分布;检测

**中图分类号:**S436.421.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)17–0020–07

黄瓜(*Cucumis sativus*)别称胡瓜、青瓜,为葫芦科(Cucurbitaceae)一年生蔓生或攀缘草本植物,是一种重要的园艺蔬菜作物<sup>[1]</sup>。黄瓜是我国主要的保护地栽培和大规模栽培的蔬菜种类,在各地蔬菜供应中起着关键作用,具有重要的食用和经济价值<sup>[2]</sup>。近年来,由于农业生产环境的变化和耕作模

式的改变,黄瓜病毒病呈现出多发的态势,对黄瓜的产量和品质造成严重影响,威胁着我国黄瓜产业的健康发展。黄瓜感染病毒以后,初期心叶出现明脉现象,之后逐渐产生花叶、重花叶、皱缩、卷曲等症状,最终导致果实凹凸不平、螺旋状扭曲、果肉僵硬、苦涩等<sup>[3]</sup>。近年来,我国科研人员对不同地区黄瓜病毒病的流行情况开展了广泛深入的研究,取得了大量的进展。本文梳理整合了前人的研究结果,综合概述了侵染我国黄瓜的病毒种类、地理分布、优势毒源及其检测方法,以期为我国黄瓜病毒病的防治工作和抗病育种研究提供参考。

## 1 侵染病毒的种类

近年来的研究表明,在全国范围内采集的黄瓜样品中检出的病毒达到 20 种之多(表 1)<sup>[4]</sup>,包括马

收稿日期:2023–09–20

基金项目:北京市教育委员会科技计划(编号:KM202212448003、KM202312448004);北京农业职业学院院级项目(编号:XY–YF–22–02、XY–KJ–22–07);国家自然科学基金(编号:32001571)。

作者简介:高 乐(1987–),男,河北石家庄人,博士,副教授,从事植物抗病毒基因工程研究。E-mail:gaole@bvca.edu.cn。

通信作者:郑志勇,硕士,教授,主要从事园艺植物栽培研究, E-mail:zhengzhiyong@bvca.edu.cn;任俊达,博士,副教授,主要从事植物病理学研究, E-mail:renjd@bua.edu.cn。

[39] Chaubell M J, Yueh S H, Dunbar R S, et al. Improved SMAP dual-channel algorithm for the retrieval of soil moisture[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(6): 3894–3905.

[40] 吴立新,齐 源,毛文飞,等. 多波段多极化被动微波遥感地震应用研究进展与前沿方向探索[J]. 测绘学报,2022,51(7):1356–1371.

[41] Kang C S, Zhao T J, Shi J C, et al. Global soil moisture retrievals from the Chinese FY–3D microwave radiation imager[J]. IEEE

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(5): 4018–4032.

[42] 王 舒. 基于被动微波遥感的地表粗糙度及土壤水分反演研究[J]. 测绘学报,2021,50(10):1419.

[43] 胡建东,李林泽. 介电特性土壤水分测定方法研究进展[J]. 河南农业大学学报,2021,55(4):1241–1249.

[44] 蒋瑞瑞,甘甫平,郭 艺,等. 土壤水分多源卫星遥感联合反演研究进展[J]. 自然资源遥感,2024,36(1):1–13.